基于改进 PSO 算法的 MAP 图标定点选择新方法 *

程　准，陆　凯，钱　煜，卢　震，鲁植雄†

(南京农业大学 工学院，南京 210031)

摘　要：为提高基于 MAP 图的控制系统驱动效果，并有效减小控制系统内的存储量，提出了一种基于改进粒子群算法的 MAP 图中标定点择优选取新方法。以液压机械无级变速传动比控制系统中采用的 MAP 图为例，将其横坐标的 2 个变量在其定义域内等分，并采用改进粒子群算法选取等分后每段内的坐标点数量和位置。选取过程采用多目标优化原理结合了随机产生的 100 个点的实际值与 MAP 图线性插值的平均误差以及选定的标定点数量。为提高算法执行效率，对粒子群算法的迭代准则、惯性权重和学习因子进行了改进。结果表明，改进后的粒子群算法收敛速度快，寻优精度高；仅需较少的标定数据即可制作控制效果较佳的 MAP 图。

关键词：改进粒子群算法；MAP 图；控制系统；液压机械无级变速器

中图分类号：O231　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.04.0218

New method of MAP fixed-point selection based on improved PSO algorithm

Cheng Zhun, Lu Kai, Qian Yu, Lu Zhen, Lu Zhixiong†

(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: In order to improve the driving effect of the control system based on MAP and reduce the storage capacity of the control system effectively, this paper proposed a new method for selecting the fixed points in the MAP based on the improved particle swarm optimization algorithm. Taking the MAP of hydraulic mechanical continuously variable transmission ratio control system as an example, it divided the 2 variables of the abscissa coordinate in its definition domain, and it used the improved particle swarm optimization algorithm to select the number and location of coordinate points in each section after equal division. The selection process was based on the principle of multi-objective optimization, which combines the actual values of 100 randomly generated points with the average error of linear interpolation of MAP and the number of selected scalar points. In order to improve the efficiency of the algorithm, it improved the iterative criteria, the inertia weight and the learning factor of the particle swarm optimization. The results show that the improved particle swarm optimization algorithm has the advantages of fast convergence speed and high optimization accuracy, and the MAP with better control effect can be made with less calibration data.

Key words: improved particle swarm optimization algorithm; MAP; control system; hydraulic machinery continuously variable transmission

0　引言

MAP 图是电控系统的核心，为控制系统提供控制参数，在工程领域亦可以称为实验数据图表。其通常以二维图表或三维图表的形式存储于控制器（ECU）中[1, 2]。通过查表的方法从 MAP 图中获取控制数据，能够有效地降低 ECU 的计算量，提高系统效率，减小响应时间并改善控制效果。所以研究 MAP 图的构成意义深远。

现阶段关于电控系统 MAP 图的研究较少[3~6]。文献[7]采用 BP 神经网络建立待标定系统的模型，再通过自适应神经模糊推理系统（ANFIS）进行非线性插值，结果表明可以有效减少 MAP 图标定实验并同时在很大程度上保证了精度。文献[8]基于镍氢电池荷电状态（SOC）的基本 MAP 图，采用曲线平移的方法插值获取了较精确的 MAP 图模型。由于该 MAP 图的数

收稿日期：2018-04-08；**修回日期：**2018-05-14　　**基金项目：**江苏省研究生科研与实践创新计划项目（KYCX17_0647）；国家重点研发计划资助项目（2016YFD0701103）

作者简介：程准（1992-），男，江苏苏州人，博士研究生，主要研究方向为车辆系统动力学与控制、智能算法；陆凯（1992-），男，河南商丘人，硕士研究生，主要研究方向为机械设计、车辆电子控制技术；钱煜（1995-），女，江苏泰州人，硕士研究生，主要研究方向为机械设计、车辆电子控制技术；卢震（1993-），女，安徽淮南人，硕士研究生，主要研究方向为机械设计、车辆电子控制技术；鲁植雄（1962-），男（通信作者），湖北武穴人，教授，博士，主要研究方向为车辆电子控制技术、车辆动力学研究与分析（1003765165@qq.com）.

据量较大，通过分割和压缩处理以提高查表速率并减小存储空间。文献[9]基于大量的实验标定了 SCR 控制参数 MAP 图。虽然 MAP 图很细致，但是增加了标定实验的数量。文献[10]对柴油机的 SCR 控制系统进行设计与研究，分别对发动机排气流量、原机排放 NO_x 浓度、循环供油量、排气温度以及 NO_x 最大转换效率的 MAP 进行了标定。但是实验标定时，总是在工况取值范围内以固定的步长进行变化。文献[11]基于输出反馈参考模型自适应控制算法来标定离合器接合控制系统的 MAP 图，虽然能在很大程度上提高系统的效果和性能，但是 MAP 图的构建过程需要参数整定，并且缺少对 MAP 图中数据点个数的研究。文献[12]对插入式并联混合配置的能量管理 MAP 图进行优化标定研究，虽然可以利用查表法获取最佳换挡、最佳转矩分配以及驱动模式，但是缺少 MAP 图标定数据的精度和个数研究。以上研究虽然都在一定程度上提高了从 MAP 图中获取控制参数的精度，但是非线性的插值方法增加了一般控制器逻辑实时处理的难度，而且并未从实际出发在本质上减少 MAP 图中标定点的数量，从而减小 ECU 中的存储空间。

针对上述问题，为有效减少 MAP 图中数据点数量，同时保证控制参数的精度以及 ECU 的处理速度，本文提出了一种基于改进的粒子群算法的 MAP 图中标定点择优选择方法。将从 MAP 图中通过简单的线性插值获取 100 个随机工况的控制参数值与实际值的平均误差以及 MAP 图中标定数据点的数量作为 2 个优化目标，通过多目标优化理论进行分析。为提高优化算法执行效率，对粒子群算法作出优化改进。本文研究以液压机械无级变速控制系统的最优经济性传动比 MAP 图为例，以期为其他领域的 MAP 图获取提供一定的理论指导。

1 液压机械无级变速器最优经济传动比 MAP 图的获取

液压机械无级变速器（HMCVT）是一种车辆上用的无级变速器。其经济性传动比 MAP 图的获取计算公式如下：

$$\min \qquad f(x)=\frac{g_e}{\eta_{cvt}} \tag{1}$$

其中：g_e 为发动机有效燃油消耗率；η_{cvt} 为 HMCVT 的传动效率；x 为三维向量，由发动机转速、扭矩和 HMCVT 传动比组成。

HMCVT 最优经济传动比 MAP 图由发动机不同转速、转矩以及满足式（1）的 HMCVT 传动比值绘制完成。某经济传动比 MAP 图如图 1 所示。

2 改进的粒子群算法

粒子群算法(particle swarm optimization，PSO)是一种基于仿生学模拟大自然鸟类活动的随机优化算法，其本质是基于群体的进化算法，通过鸟类群体间的交流和个体对历史最佳位置的记忆来不断迭代寻优[13~17]。其速度更新采用如下公式：

$$v_i^{d+1}=\omega v_i^d+c_1r_1(p_i^d-x_i^d)+c_2r_2(p_g^d-x_i^d) \tag{2}$$

其中：v_i^d 为第 i 个粒子第 d 次迭代的飞行速度；ω 为惯性权重；c_1 和 c_2 为学习因子；r_1 和 r_2 为 0~1 之间的随机数；p_i^d 为第 i 个粒子第 d 次迭代的历史最佳值；p_g^d 为所有粒子第 d 次迭代的历史最佳值。

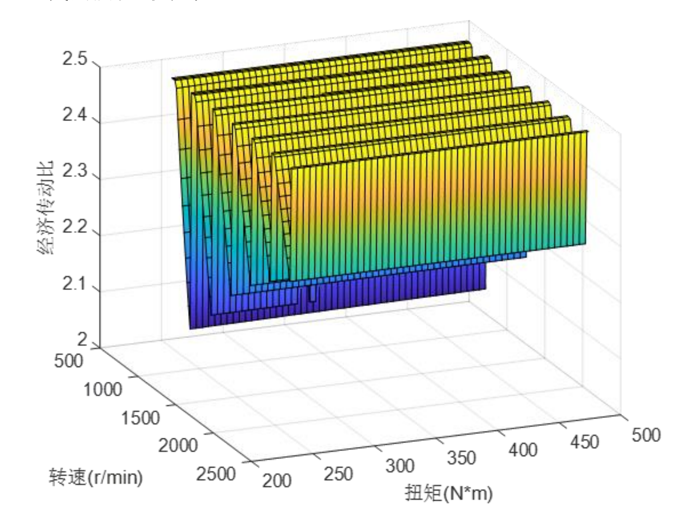


图 1 HMCVT 经济传动比 MAP 图

PSO 算法受其算法参数的影响较大，若 PSO 中的粒子向个体或者群体的历史最佳位置聚拢速度较快，则会形成趋同效应，这使得算法容易早熟。为提高算法收敛速度和寻优精度，采用如下方法对 PSO 进行改进：

a）惯性权重 ω 自适应变化。惯性权重 ω 可以影响微粒群算法的局部最优能力和全局最优能力。较大的权重有利于提高算法的全局粗犷搜索能力，而较小的权重会增强算法的局部精确搜索能力。由此可见目标函数每代下降速率较慢时需要大的权重以便于跳出局部最优点，下降速率较快时需要小的权重以便于精确搜索。为使得惯性权重匹配算法迭代情况，基于查表法来设计惯性权重。在某次迭代过程中，若目标函数的下降幅度在 0~30%间，则 ω 在区间[0.2, 0.7]内随机产生；若目标函数的下降幅度在 30%~100%间，则 ω 参考上一次迭代的取值；若目标函数的下降幅度连续 5 代没有变化，则 ω 取值为 1；若目标函数的下降幅度连续 10 代没有变化，则 ω 取值为 2。

b）算法搜索的后期由学习因子 c_1 和 c_2 的不断减小来保证精确的局部搜索需求。学习参数的改进参见文献[18]。

c）引入模拟退火算法的概率判断 Metropolis 准则，该准则如式（3）所示。

$$P=e^{(-\frac{\Delta E}{T})} \tag{3}$$

其中：P 为接受差解的概率；ΔE 为前后 2 代目标函数的差值；

T 为模拟退火算法中的温度参数，其随迭代次数的增加而不断下降。Metropolis 准则的引入使得 PSO 算法在算法迭代的初期和中期能够有一定的概率接受较差的解，避免了早熟现象，提高了寻找到全局最优解的可能性。

为验证改进 PSO 算法的效果，采用如下测试函数：

$$f(x_1,x_2)=\frac{\sin^2\sqrt{x_1^2+x_2^2}}{[1+0.001(x_1^2+x_2^2)]^2} \quad (4)$$

该测试函数有唯一最小值 0，其所对应的最小值点为(0, 0)。粒子群规模为 20，算法最大迭代次数为 20，测试结果如图 2 所示。

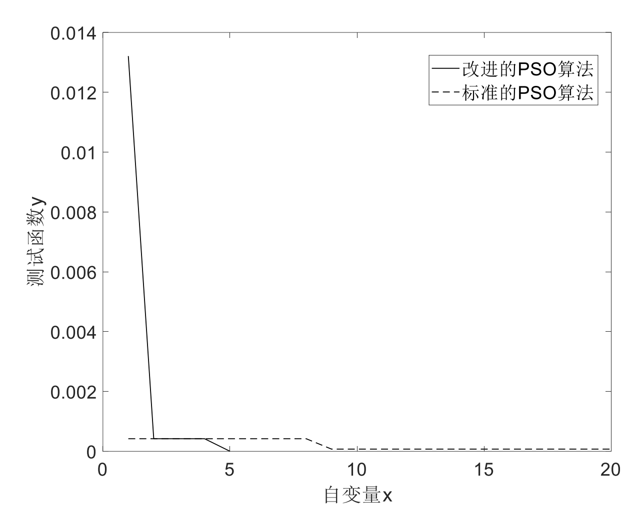


图 2 测试函数迭代进化图

根据图 2，本文提出的改进 PSO 算法在第 5 代时已经优化得到最小值，并跳出了迭代循环。而标准的 PSO 算法在第 9 代陷入局部最小值，并未找到最优解，其找到的解为(-5, 8)，对应的值为 0.00071。

3 择优选定 MAP 图标定点的方法

以 MAP 图中标定数据点的位置及数量作为决策变量。为使得决策变量更符合算法编程和实际优化的需求，将 MAP 图中自变量的 2 个坐标在其定义域内分为 5 个等份，并设每个等份中的坐标数量为算法运行中的决策变量。以 HMCVT 经济传动比 MAP 图为例，其决策变量如下所示：

$$X=[q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,p_1,p_2,p_3,p_4,p_5] \quad (5)$$

其中：q_i 为转速在其定义域内第 i 个等份中被选择坐标点的数量；p_i 为扭矩在其定义域内第 i 个等份中被选择坐标点的数量。

在每个等份内被选择的坐标点数值根据其区间长度按数量进行平分来确定。

优化目标有两个。第一个为随机产生 100 个不同转速、扭矩值并基于 MAP 图采用简单的线性插值方法获取的值与实际值的平均误差，第 d 代第 i 个粒子的目标函数 f_1 计算公式如下：

$$f_1(X_i^d)=\sum_{j=1}^{100}\left(1-\frac{|z_j-z_j'|}{z_j}\right)\times 100\% \quad (6)$$

其中：X_i^d 为第 d 代第 i 个粒子；z_j 为第 j 个随机工况（转速和扭矩随机产生）的传动比实际值；z_j' 为第 j 个随机工况采用线性插值方法获得的传动比值。

第二个优化目标为 MAP 图中标定数据点的数量，第 d 代第 i 个粒子的目标函数 f_2 计算公式如下：

$$f_2(X_i^d)=\sum_{j=1}^{5}(p_j+q_j) \quad (7)$$

由于优化过程涉及到两个不同数量级的目标函数，采用分配权重系数的方法对该多目标优化问题进行处理。

4 实验结果与分析

采用本文提出的改进 PSO 算法对 HMCVT 经济传动比 MAP 图中的标定数据点进行择优选取。粒子群规模设置为 50，最大迭代次数为 200。寻优迭代进化结果如图 3 所示。

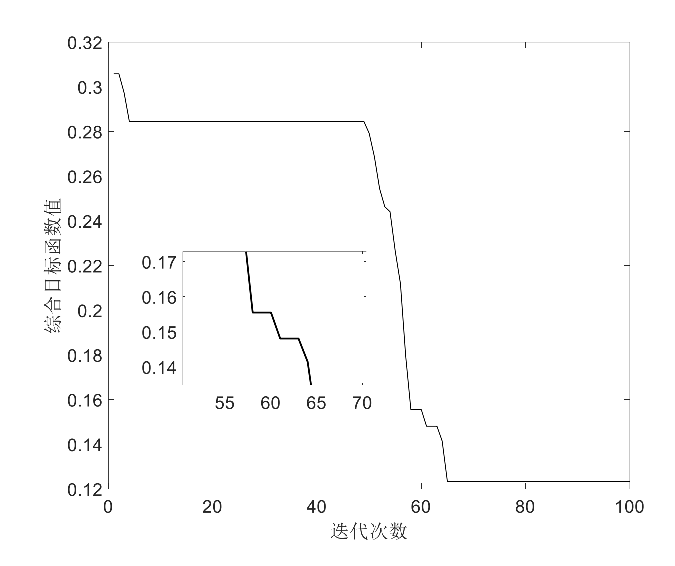


图 3 MAP 图标定点择优选取进化图

转速和扭矩在其各自每个等份内坐标点的数量如表 1 所示。

表 1 MAP 图中每个等份内坐标点的数量

q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
2	2	20	2	2	2	2	2	2	9

择优选取标定点绘制的 MAP 图如图 4 所示。

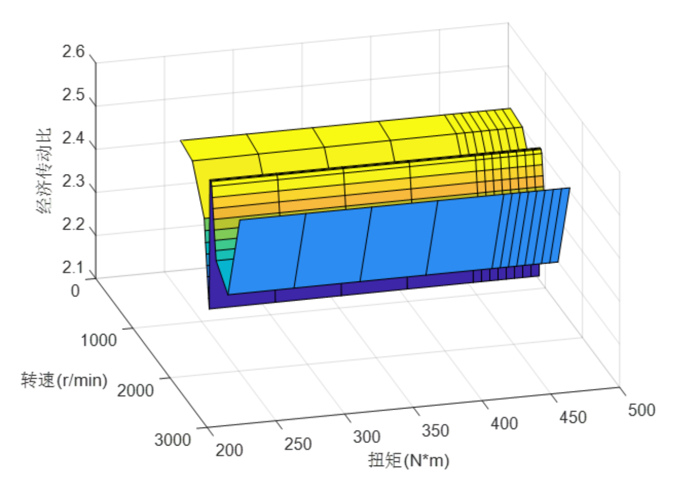


图 4　标定点择优选取后的 MAP 图

采用简单的线性插值方法基于图 4 获取 100 个随机工况的传动比值，其与实际传动比值的平均误差仅为 3.7 %，该 MAP 图中转速和扭矩选择的坐标数量分为 28 和 17 个，总标定点数为原图 1 中的 15.9 %。

5　结束语

a）本文提出的惯性权重系数自适应改进方法有效提高了 PSO 算法的收敛速度和寻优精度，该方法将惯性权重系数与算法目标函数下降幅度结合起来，通过查表的方法动态确定每代的惯性权重值，结果表明仅用 5 次迭代即实现对测试函数最小值的寻优分析。

b）本文提出的基于进化算法的 MAP 图中标定数据点择优选取方法能高效的减小 MAP 图中的数据量，以 HMCVT 经济传动比 MAP 图为例，优化后数据总量为原先的 15.9 %，能够在很大程度上减小 ECU 中的存储量。并且采用的查表方法为最简单的线性插值法，有利于 ECU 的处理和计算，本例中 MAP 图的平均误差仅为 3.7 %。

参考文献:

[1] 张志超. 高压共轨柴油机控制 MAP 体系研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015. (Zhang Zhichao. Study on control MAP system of high pressure common Rail diesel engine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.)

[2] 沈晓勇. 基于 MAP 图的双集成车用驱动电机系统研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (Sheng Xiaoyong. Study on double integrated vehicle drive motor system based on MAP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)

[3] 黄贵芬, 陈虹, 胡云峰. 基于模型和MAP图的汽油发动机气路控制 [J]. 系统科学与数学, 2011, 31 (12): 1592-1601. (Huang Guifen, Chen Hong, Hu Yunfeng. Model and MAP based gasoline engine airpath control [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2011, 31 (12): 1592-1601.)

[4] 周广猛, 刘瑞林, 周平, 等. 基于多项式回归模型的高压共轨柴油机的标定 [J]. 汽车工程, 2012, 34 (4): 301-305. (Zhou Guangmeng, Liu Ruilin, Zhou Ping, *et al.* The calibration of high-pressure common-rail diesel engine based on polynomial regression model [J]. Automotive Engineering, 2012, 34 (4): 301-305.)

[5] 王天利, 于瀛霄, 张大明. 基于 MAP 图的微型电动汽车驱动电机匹配研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2013, 51 (7): 17-20. (Wang Tianli, Yu Yingxiao, Zhang Daming. Study on matching of driving motor for miniature electric vehicle based on the MAP diagram [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2013, 51 (7): 17-20.)

[6] Langouët H, Métivier L, Sinoquet D, *et al.* Engine calibration: multi-objective constrained optimization of engine MAPs [J]. Optimization and Engineering, 2011, 12 (3): 407-424.

[7] 韩强, 杨福源, 张京永, 等. 用于标定和优化的高压共轨柴油机建模 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44 (11): 1524-1527, 1535. (Han Qiang, Yang Fuyuan, Zhang Jingyong, *et al.* High pressure common rail diesel engine modeling for calibration and optimization [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology) , 2004, 44 (11): 1524-1527.)

[8] 胡志坤, 王文祥, 林勇, 等. 基于 4 维 MAP 图的镍氢电池 SOC 估计方法 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (2): 83-89. (Hu Zhikun, Wang Wenxiang, Lin Yong, *et al.* Four-dimensional Map based Ni-MH battery’s SOC estimation method [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16 (2): 83-89.)

[9] 邓成林, 罗云威, 李浩, 等. 柴油机 Urea-SCR 系统标定试验研究 [J]. 汽车工程, 2013, 35 (1): 32-36, 77. (Deng Chenglin, Luo Yunwei, Li Hao, *et al.* An experimental study on the calibration of Urea-SCR system in diesel engine [J]. Automotive Engineering, 2013, 35 (1): 32-36, 77.)

[10] 胡杰, 王立辉, 王天田. 柴油机 Urea-SCR 控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (2): 349-356. (Hu Jie, Wang Lihui, Wang Tiantian. Design and test of Urea-SCR control system for diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (2): 349-356.)

[11] Huang Wei, Wong Pak Kin, Zhao Jing, *et al.* Output-feedback model-reference adaptive calibration for map-based anti-jerk control of electromechanical automotive clutches [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2018, 32 (2): 265-285.

[12] Schori M, Boehme, T J, Frank B, *et al.* Optimal calibration of map-based energy management for plug-In parallel hybrid configurations: a hybrid optimal control approach [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2015, 64 (9): 3897-3907.

[13] Wang Dongshu, Tan Dapei, Liu Lei. Particle swarm optimization algorithm: an overview [J]. Soft Computing, 2018, 22 (2): 387-408.

[14] Wu Qinghua, Song Tao, Liu Hanmin, *et al.* Particle swarm optimization algorithm based on parameter improvements [J]. Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering, 2017, 17 (3): 557-568.

[15] Zhang Geng, Li Yangmin, Shi Yuhui. Distributed learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal problems [J]. Frontiers of

Computer Science, 2018, 12 (1): 122-134.

[16] 谢国民，刘叶，付华，等. 基于 PSO-GSA 优化的井下加权质心人员定位算法 [J]. 计算机应用研究，2017，34 (3): 710-713. (Xie Guomin, Liu Ye, Fu Hua, *et al.* Improved downhole weighted centroid localization algorithm based on PSO-GSA [J]. Application Research of Computers, 2017, 34 (3): 710-713.)

[17] 张勇，陈玲，徐小龙，等. 基于 PSO-GA 混合算法时间优化的旅行商问题研究 [J]. 计算机应用研究，2015，32 (12): 3613-3617. (Zhang Yong, Chen Ling, Xu Xiaolong, *et al.* Research on time optimal TSP based on hybrid PSO-GA [J]. Application Research of Computers, 2015, 32 (12): 3613-3617.)

[18] 程准，鲁植雄，唐迪，等. 基于改进 PSO 算法的拖拉机驱动防滑 PID 控制策略 [J]. 计算机应用研究，2017，34 (1): 83-86. (Cheng Zhun, Lu Zhixiong, Tang Di, *et al.* PID control strategy of tractor driving anti slip control based on improved PSO algorithm [J]. Application Research of Computers, 2017, 34 (1): 83-86.)